

## © WPI / DERWENT

- AN - 1978-32279A [18]
- TI - Nuclear fuel rod with plenum - contg. added gas with higher pressure and thermal conductivity than filling gas
- AB - DE2624326 In a nuclear fuel rod with a plenum for a filling gas and fission gases and increase in the vol. of the fuel, the filling gas contains an added gas (mixt.) with a higher pressure,  $P_g$  and thermal conductivity than the filling gas.
- P[ef. the fuel consists of a carbide fuel with He bonding, fuel oxides and nitrides or vibrated or kernel fuels, esp. UC<sub>2</sub>-PuC<sub>2</sub> with a U<sup>235</sup> enrichment of 93% and with 15% Pu. The plenum is a gap between the filling and the tubular sheath. The gas added can be He, Ne, Ar, N<sub>2</sub> etc. and the gas pressure  $P_g$  in the plenum can be adjusted to 1 to over 12 at.
- The additive overcomes the problems associated with poor heat transfer.
- W - NUCLEAR FUEL ROD PLENUM CONTAIN ADD GAS HIGH PRESSURE THERMAL CONDUCTING FILL GAS
- PN - DE2624326 A 19780427 DW197818 000pp  
- DE2624326 C 19820916 DW198238 000pp
- IC - G21C3/18
- MC - K05-B04B
- DC - K05
- PA - (GESL ) GES FUER KERNFORSCHUNG GMBH
- IN - ELBEL H; STEINER H
- PR - DE19762624326 19760531

BEST AVAILABLE COPY

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

51

Int. Cl. 2:

**G 21 C 3/18**

19 **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

**DEUTSCHES**



**PATENTAMT**

**DE 26 24 326 A 1**

11

# **Offenlegungsschrift 26 24 326**

21

Aktenzeichen:

P 26 24 326.5

22

Anmeldetag:

31. 5. 78

43

Offenlegungstag:

27. 4. 78

31

Unionspriorität:

32 33 31

54

Bezeichnung:

Brennstab

71

Anmelder:

Gesellschaft für Kernforschung mbH, 7600 Karlsruhe

72

Erfinder:

Elbel, Helmut, Dipl.-Phys., 7513 Stutensee;  
Steiner, Helmut, Dipl.-Phys. Dr., 7616 Hochstetten

**DE 26 24 326 A 1**

Patentansprüche :

1. Brennstab mit einer Kernbrennstabfüllung und einem Plenum bzw. Spaltvolumen für ein Füllgas und zur Aufnahme von Spaltgasen sowie einer Volumenvergrößerung der Kernbrennstabfüllung, dadurch gekennzeichnet, daß in das Plenum zum Füllgas ein Zusatzgas- oder Gasgemisch von höherem Druck  $p_g$  und Wärmeleitfähigkeit als dem Druck und der Wärmeleitfähigkeit des Füllgases eingefüllt ist.
2. Brennstab nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kernbrennstabfüllung aus einem Karbid-Brennstoff mit Helium-Bindung, Brennstoffoxiden- und Nitriden oder vibrierten oder Kernel-Brennstoffen besteht.
3. Brennstab nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Plenum die Form eines Spaltes zwischen der Kernbrennstabfüllung und einem Hüllrohr besitzt.
4. Brennstab nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, daß das Zusatzgas- oder Gasgemisch aus Helium, Neon, Argon, Stickstoff oder anderen geeigneten Gasen bzw. Gasgemische besteht.
5. Brennstab nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, daß die Karbid-Brennstabfüllung mit Helium-Bindung aus  $UC_2$ - $PuC_2$  mit einer U-235-Anreicherung von 93 % und einem Pu-Anteil von 15 % besteht.
6. Brennstab nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, daß der Gasdruck  $p_g$  im Plenum auf 1 bis über 12 at einstellbar ist.

2

GESELLSCHAFT FÜR  
KERNFORSCHUNG MBH

Karlsruhe, den 11.5.1976  
PLA 7625 Ga/wk

2624326

B r e n n s t a b

- 1 -

809817/0002

**Beschreibung:**

Die Erfindung betrifft einen Brennstab mit einer Kernbrennstabfüllung und einem Plenum bzw. Spaltvolumen für ein Füllgas und zur Aufnahme von Spaltgasen sowie einer Volumenvergrößerung der Kernbrennstabfüllung.

Es ist an sich bekannt, daß bei Druckwasserreaktoren ein erhöhter Füllgasdruck verwendet wird mit dem Ziel, die durch den hohen Kühlmitteldruck hervorgerufene mechanische Belastung des Zirkaloy-Hüllrohres zu mindern.

Auch ist es aus physikalischen Gründen zu vermuten, daß das Bestrahlungsverhalten von z.B. Karbid-Brennstäben mit Helium-Bindung durch Schwelleigenschaften und Spaltgasfreisetzung in starkem Maße bestimmt wird. Beide Phänomene sind temperaturabhängig und beeinflussen die Wärmeableitung aus dem Brennstab durch Veränderung sowohl der Geometrie des Spaltes zwischen Brennstofftablette und Hüllrohr als auch der Zusammensetzung

des in diesem Spalt befindlichen Gases. Schwellen und Spaltgas-freisetzung wirken dadurch auf das Temperaturniveau der Brennstoff-tablette zurück. Der Einfluß des aus dem Brennstoff freigesetzten Gases ist dabei von seinem Mengen-Verhältnis zu dem bereits vorhandenen Füllgas abhängig.

Die Aufgabe der Erfindung besteht nunmehr darin, diesen Einfluß, der in einer Verschlechterung der Wärmeableitung besteht, zu vermindern.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß in das Plenum zum Füllgas ein Zusatzgas- oder gasgemisch von höherem Druck und Wärmeleitfähigkeit als der Druck und die Wärmeleitfähigkeit des Füllgases eingefüllt ist.

Bei Ausführungsformen der Erfindung kann vorgesehen sein, daß die Kernbrennstabfüllung aus einem Karbid-Brennstoff mit Helium-Bindung, Brennstoffoxiden- und Nitriden oder vibrierten oder Kernel-Brennstoffen besteht.

Eine Weiterbildung der Erfindung sieht vor, daß das Plenum die Form eines Spaltes zwischen der Kernbrennstab-Füllung und einem Hüllrohr besitzt. In einer vorteilhaften Ausgestaltungsform der Erfindung kann hierbei in das Plenum als Zusatzgas- oder gasgemisch Helium, Neon, Argon oder Stickstoff eingefüllt werden.

Eine Ausbildungsform des erfindungsgemäßen Brennstabes ist dadurch gekennzeichnet, daß die Karbidbrennstabfüllung mit Helium-Bindung aus  $UC_2$ - $PuC_2$  mit einer U-235-Anreicherung von 93 % und einem Pu-Anteil von 15 % besteht. Der Gasdruck im Plenum kann von 1 bis über 12 Atmosphären einstellbar sein.

Dieser erfindungsgemäße Brennstab kann verwirklicht werden, wenn die Erhöhung des Einfülldruckes zusammen mit der Druckzunahme in Folge der Spaltgasfreisetzung zu keiner signifikanten Hüllrohrbelastung während des Betriebes führt. Da z.B. bei karbidischem Brennstoff mit einer geringeren Spaltgasfreisetzung im Vergleich zu oxidischem Brennstoff gerechnet werden kann, ist es möglich, bei gleicher Auslegungsgrenze der Hüllrohrbelastung einen entsprechend erhöhten Einfülldruck zuzulassen.

Die besonderen Vorteile der erfindungsgemäßen Lösung bestehen darin, daß der Effekt der Verbesserung des Wärmetransports durch den Spalt bzw. die Kontaktzone zwischen Brennstoff und Hüllrohr durch Erhöhung des Einfülldrucks bzw. der Füllgasmenge für alle Füllgase bzw. Füllgasgemische gültig ist, deren Wärmeleitungseigenschaften besser als die der freigesetzten Spaltprodukte (im wesentlichen die Spaltgase Xenon und Krypton) sind. Der Effekt ist prinzipiell von der Art und den Dimensionen des Brennstoffs und des Hüllrohrs unabhängig.

Zum technischen Verständnis der erfindungsgemäßen Maßnahmen werden im folgenden einige physikalisch-technische Zusammenhänge aufgezeigt.

Für den Wärmeübergang vom Brennstoff zur Hülle kommen im wesentlichen die folgenden Mechanismen in Betracht.

- a) Wärmestrahlung ( $h_r$ )
- b) Wärmeleitung im Bonding ( $h_g$ )
- c) Wärmeleitung der sich berührenden Festkörper ( $h_s$ )

Der Betrag der Wärmestrahlung zum Gesamtwärmeübergang beträgt im Extremfall (Brennstoffrandtemperatur ca.  $2000^\circ\text{K}$ ) höchstens 10 % des Beitrags von der Wärmeleitung im Bonding, kann also vernachlässigt werden.



Die Wärmeübergangszahl  $hg$  berechnet sich nach Gleichung (1)

$$hg = \frac{\bar{\lambda}_g}{\delta + \sum_{j=1,2} l_{ex,j} + \sum_{j=1,2} Ra_j} \quad (1)$$

Dabei ist  $\delta$  die radiale Spaltbreite,  $\sum_{j=1,2} l_{ex,j}$  die Summe der Extrapolationslängen von Brennstoff und Hülle,  $\sum_{j=1,2} Ra_j$  die Summe ihrer arithmetisch gemittelten Rauigkeiten und  $\bar{\lambda}_g$  die Wärmeleitfähigkeit der Gasmischung.

Für ein Gasgemisch von  $n$ -Komponenten ist  $\bar{\lambda}_g$  nach Gleichung 2 gegeben durch :

$$\bar{\lambda}_g = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{1 + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{C_j}{C_i} \frac{B_{ij}}{C_i}} \quad (2)$$

mit

$$B_{ij} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \sqrt{\frac{u_i}{u_j} \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{3/4} \cdot \frac{1 + \frac{S_i}{S_j/T}}{1 + \frac{S_j}{T}}} \right\}^{1/2} \cdot \frac{1 + \frac{S_i}{T} \frac{S_j}{T}}{1 + \frac{S_i}{T}} \quad (3)$$

und mit

$$\frac{u_i}{u_j} = \frac{\lambda_i}{\lambda_j} \cdot \frac{C_{p,j}}{C_{p,i}} \cdot \frac{9 - 5 \cdot \frac{C_{v,j}}{C_{p,i}}}{9 - 5 \cdot \frac{C_{v,i}}{C_{p,i}}} \quad (4)$$

Hierbei sind :

- $M_i$  = Molekulargewicht des Gases  $i$
- $S_i$  = Sutherland-Konstante des Gases  $i$
- $C_{v,i}, C_{p,i}$  = spezifische Wärmen des Gases  $i$
- $\lambda_i$  = Wärmeleitfähigkeit des Gases
- $C_i$  = Konzentration des Gases

Die Extrapolationslängen  $l_{ex}$  sind dem Gasdruck  $p$  nach Gleichung 5 proportional.

$$l_{ex} \sim \frac{1}{p} \quad (5)$$

Eine Erhöhung des Gasdrucks führt also zu einer Verkleinerung der Extrapolationslängen. Dies ist sehr wichtig für kleine Spalte bzw. für geschlossenen Spalt, da in diesem Bereich die Extrapolationslänge (siehe (1)) nicht gegen  $\delta$  zu vernachlässigen ist.

Bei vorgegebenem Volumen des Spaltgasplenums und vorgegebener Temperatur ist die Menge des eingefüllten Gases eine Funktion des Drucks allein ( $pV = nRT$ ). Sei  $V_o$  die Anzahl der eingefüllten Gasmole und werden bis zu einem Abbrand  $A$   $V_f$  Mole Spaltgas freigesetzt, dann sind die Konzentrationen an Füll- und Spaltgas gegeben durch die Gleichungen 6 und 7.

$$C_{\text{Füll}} = \frac{V_o}{V_o + V_f} \quad (6)$$

$$C_{\text{Spalt}} = \frac{V_f}{V_o + V_f} \quad (7)$$

Durch eine Variation des Einfülldrucks läßt sich also das Verhältnis  $C_{\text{Füll}}/C_{\text{Spalt}}$  steuern. Da nun  $\bar{\lambda}_g$  und damit auch  $h_g$  von den Konzentrationen der einzelnen Gaskomponenten abhängt, kann auf diese Weise der Wärmeübergang zwischen Brennstoff und Hülle beeinflusst werden.

Die Erfindung wird nunmehr im folgenden anhand eines Ausführungsbeispiels mit Karbid-Brennstoff mittels der Figuren 1 bis 8 sowie den Tabellen I und II näher erläutert.

Die Untersuchung wurde an einem Referenzstab mit den charakterisierenden Daten und Betriebsbedingungen, wie sie in der folgenden Tabelle I zusammengefaßt sind, durchgeführt und ausgelegt. Zu Vergleichszwecken wurden vier verschiedene Spaltbreiten bei unveränderter Schmierdichte betrachtet.

Tabelle I:

Brennstoff:

Material	UC <sub>2</sub> -PuC <sub>2</sub>
U-235-Anreicherung	93 %
Pu-Anteil	15 %
theoretische Dichte	13,63 g/cm <sup>3</sup>
Tablettendichte	83 % th. D.
Außendurchmesser	6,74 mm (zu $d_R = 180 \mu\text{m}$ )

Hüllrohr:

Material	Werkstoff-Nr. 1.4988
Innendurchmesser	7,10 mm
Außendurchmesser	8,00 mm

Brennstab:

Schmierdichte	75 % th. D.
Spaltbreite, radial	225, 180, 125 und 75 $\mu\text{m}$
Füllgas	90 % He + 10 % Ar-Äquivalent
Fülldruck (bei 20°C)	1., 3., 6. und 9. at
Plenumvolumen	9 cm <sup>3</sup>

Betriebsbedingungen:

Stableistung	800 W/cm
Hülloberflächentemperatur	340°C
Plenumtemperatur	100°C

808617/0002

Die den Experimenten vorausgegangenen theoretischen Berechnungen wurden mit der Version 1k des Rechenprogrammsystems SATURN 1 durchgeführt. Diese Version enthält ein Unterprogramm zur Bestimmung der Wärmedurchgangszahl durch den Spalt, das deren Abhängigkeit von Stabileistung, Spaltbreite und Zusammensetzung, Druck und Temperatur des wärmeleitenden Gases berücksichtigt. Das Schwellverhalten des Brennstoffs wurde nach den mit in Tabelle II angegebenen Schwellraten beschrieben.

Tabelle II:

$T/^{\circ}\text{C}$	$B/\text{cm}^3/\text{W h}$	
20	0,45	$10^{-8}$
900	0,45	$10^{-8}$
1000	0,49	$10^{-8}$
1100	0,58	$10^{-8}$
1200	0,79	$10^{-8}$
1300	1,06	$10^{-8}$
2000	2,10	$10^{-8}$
2700	4,20	$10^{-8}$

Es ist angenommen, daß die durch Schwellen hervorgerufene Volumenvergrößerung der Brennstofftablette erst ab einem Abbrand von rd. 1 % PIMA wirksam wird.

Eine Temperaturabhängigkeit der Freisetzungsraten wurde durch Verwendung eines integralen Wertes vernachlässigt. In Fig. 1 (aufgetragen ist relativer Druckzuwachs und Helium-Konzentration in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit, radiale Spaltbreite 180  $\mu\text{m}$ , Parameter: Einfülldruck, Zeit  $t$  in Stunden) ist die aus diesen Raten bestimmte Änderung des Gasdruckes und der Konzentration des Füllgases für zwei verschiedene Einfülldrucke 1 at und 9 at dargestellt.

Es hat sich nunmehr herausgestellt, daß mit zunehmendem Gasdruck  $p_g$  der Wärmeübergang von der Brennstofftablette zum Füllgas und vom Füllgas zum Hüllrohr besser wird. Die Temperatur der Brennstofftablette nimmt ab. In der Figur 2 ist dieser Effekt für verschiedene Ausgangsspaltbreiten (in  $\mu\text{m}$ ) anhand der Brennstoff-Zentraltemperatur  $T_z$  in  $^{\circ}\text{C}$  als Funktion des Gasdruckes im Heißzustand bei konzentrischer Lage der Brennstofftablette dargestellt. Parameter ist die Fertigungsspaltbreite, radial. Dabei liegt die Tablette konzentrisch im Hüllrohr. Die durch die Erhöhung des Druckes ( $p_g$  in at) bewirkte Temperatursenkung beträgt in dem gewählten Beispiel etwa 60 bis  $80^{\circ}\text{C}$ . Dabei ist zu bedenken, daß bei höherem Einfülldruck der Brennstoff kälter ist und sich dadurch weniger stark ausdehnt. Der Spalt ist somit größer. Der Verbesserung der Wärmeableitung in Folge der Druckerhöhung steht eine, allerdings weniger effektive Verschlechterung durch die Vergrößerung der Spaltbreite gegenüber (eine Druckabhängigkeit der Wärmeleitung durch das Füllgas selbst ist im übrigen bei den Rechnungen nicht berücksichtigt; sie würde zu einer weiteren Absenkung des Temperaturniveaus in der Brennstofftablette führen).

Um das Verhalten während der Bestrahlung zu untersuchen, wurde von beiden Effekten nur der erste berücksichtigt. Zu diesem Zweck ist das Verhalten eines Brennstabes mit einer radialen Spaltbreite von  $180\ \mu\text{m}$  bis zum Schließen des Spaltes bei zwei verschiedenen Füllgasdrücken (1 und 9 at bei  $20^{\circ}\text{C}$ ; siehe Fig. 1) verfolgt.

Den Verlauf der Zentraltemperatur  $T_z$  zeigt die Fig. 3 (aufgetragen ist die Brennstoff-Zentraltemperatur  $T_z$  in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit  $t$  in Stunden, radiale Spaltbreite  $180\ \mu\text{m}$ , Parameter: Einfülldruck). Beim höheren Einfülldruck macht sich die Spaltgasfreisetzung (vergl. Fig. 1) erst zu einem späteren Zeitpunkt bemerkbar, ausgedrückt in einer Erhöhung der Temperatur. Die Fig. 4 zeigt den Effekt bei der Brennstoffrandtemperatur  $T_{Ba}$ , wobei diese in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit  $t$  und einer radialen Spaltbreite von  $180\ \mu\text{m}$  sowie dem Parameter: Einfülldruck aufgetragen ist.

Die durch die Spaltgasfreisetzung hervorgerufene Temperaturerhöhung führt durch zusätzliche thermische Ausdehnung und Verstärkung des Schwelleffektes zu einem beschleunigten Schließen des Spaltes und ist in der Fig. 5 (radiale Spaltbreite  $\delta$  ( $\mu\text{m}$ ) gegen  $t$  (h)) aufgetragen. Hier wird weiter der zeitliche Verlauf der Spaltbreite  $\delta$  für die beiden Einfülldrücke 1 at und 9 at verglichen. Das bei dem hohen Einfülldruck günstigere Verhalten ist darauf zurückzuführen, daß beim niederen Einfülldruck zum einen die Spaltbreite schon vor dem Einwirken der Spaltgasfreisetzung deutlich kleiner ist und zum anderen das beschleunigte Schließen des Spaltes früher und massiver einsetzt.

Die durch Erhöhung des Einfülldrucks mögliche Verlängerung der Zeitdauer bis zum Schließen des Spaltes ist in der Fig. 6 (Bestrahlungszeit  $t$  konstant über  $p_g$  (at)) für den zugrundegelegten Referenzstab mit einer radialen Spaltbreite von 180  $\mu\text{m}$  dargestellt. In diesem Fall ist eine Verlängerung von rund 4750 h bis auf rund 6500 h zu erwarten. Bei hohen Drücken tritt eine Sättigung ein, da das temperaturunabhängige Festkörperschwellen in jedem Fall zu einem Schließen des Spaltes führen wird.

Die Fig. 7 gibt den für die gewählte lineare Stableistung von 800 W/cm gültigen Zusammenhang zwischen Abbrand  $A$  (% FIMA) und Bestrahlungszeit  $t$  (h) wieder.

Die Wärmedurchgangszahl  $h$  durch den gasgefüllten Spalt ist in Fig. 8 als Funktion der Spaltbreite  $\delta$  ( $\mu\text{m}$ ) für reines Helium und für ein Gasgemisch aus 50 % Helium und 50 % Argon, Gasdruck 1  $\text{kp/cm}^2$ , Hülleninnentemperatur 400°C dargestellt.

Die Erhöhung des Einfülldruckes beeinflusst das Bestrahlungsverhalten einer Brennstofftablette in zweierlei Weise. Zum einen werden, zusammenfassend gesehen, die Brennstofftemperaturen abgesenkt und zum anderen die effektive Spaltbreite  $\delta$  vergrößert. Aufgrund einer größeren Wärmedurchgangszahl  $h$  bei höherem Einfülldruck kommt es infolge der niedrigeren Brennstofftemperatur  $T_2$  zu einer geringeren thermischen Ausdehnung des Brennstoffes

als bei niederem Einfülldruck, so daß eine größere Spaltbreite resultiert. Durch die größere Menge an gut wärmeleitendem Füllgas wird daher die Verschlechterung des Wärmedurchgangs durch den Spalt infolge der Freisetzung des Spaltgases weniger stark bemerkbar. Daneben ist die Volumenvergrößerung des Brennstoffes durch das bei niederen Temperaturen geringere Schwellen des Brennstoffs vermindert. Auch kann durch die Heraufsetzung des Einfülldruckes die Standzeit  $t$  von heliumgebundenen Karbid-Brennstäben verlängert werden.

Leerseite

- 13 -



2624326

PLA 7625

Nummer:

26 24 326

Int. Cl.2:

G 21 C 3/18

Anmeldetag:

31. Mai 1976

Offenlegungstag:

27. April 1978

Fig.1

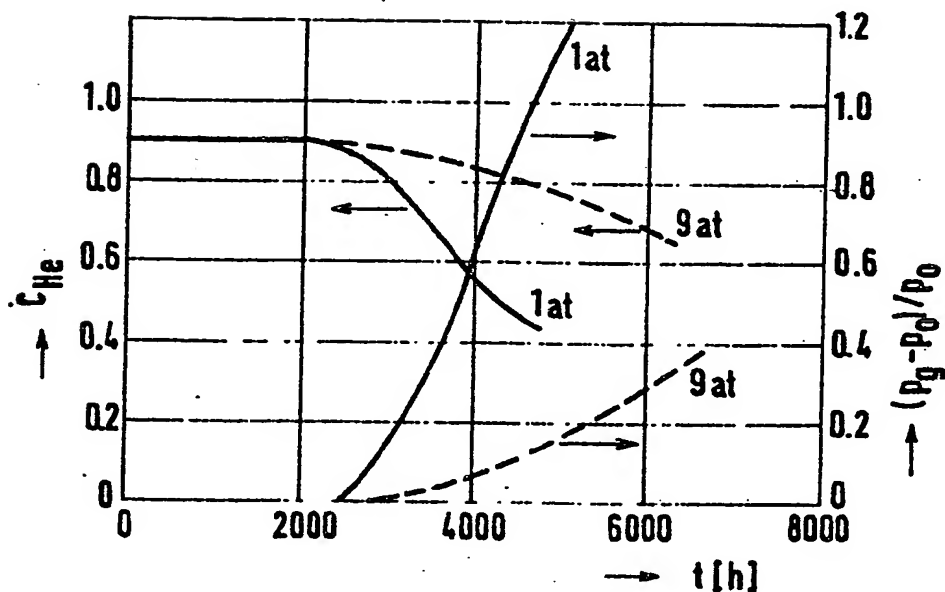
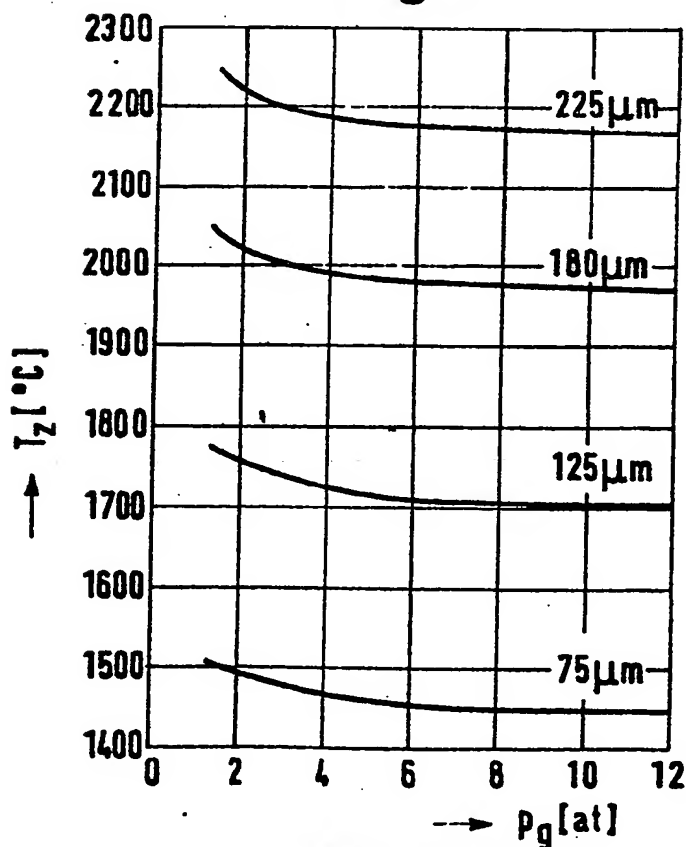


Fig.2



809817/0002

2624326

Fig.3

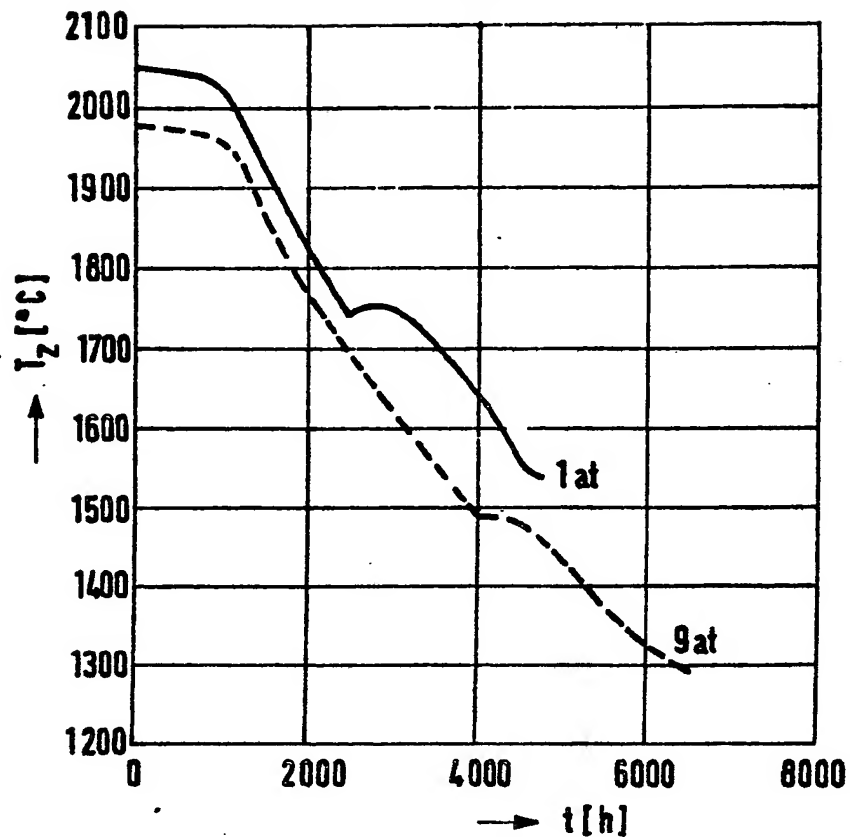
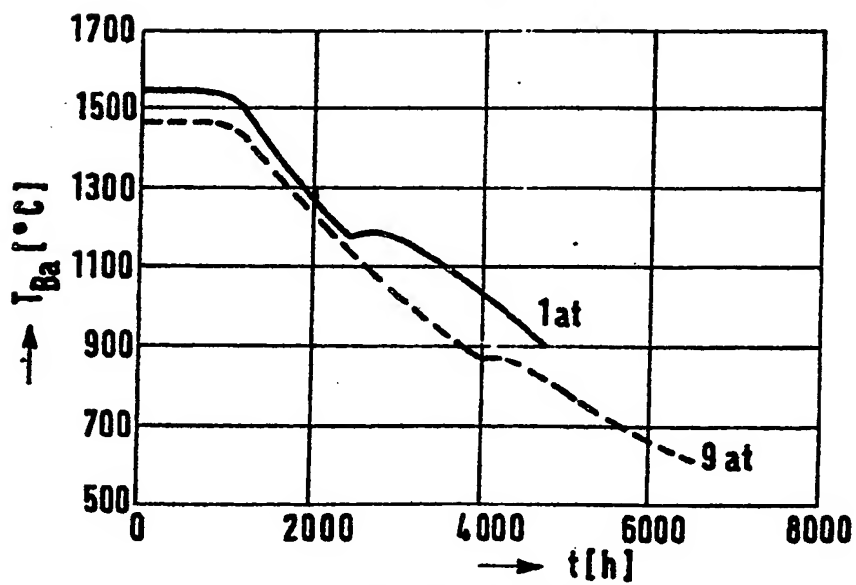


Fig.4



809817/0002

- 15 -

2624326

Fig.5

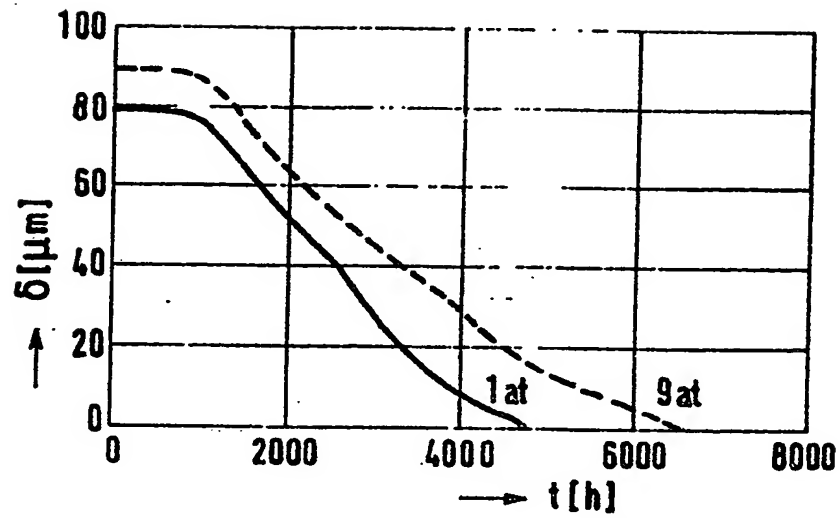
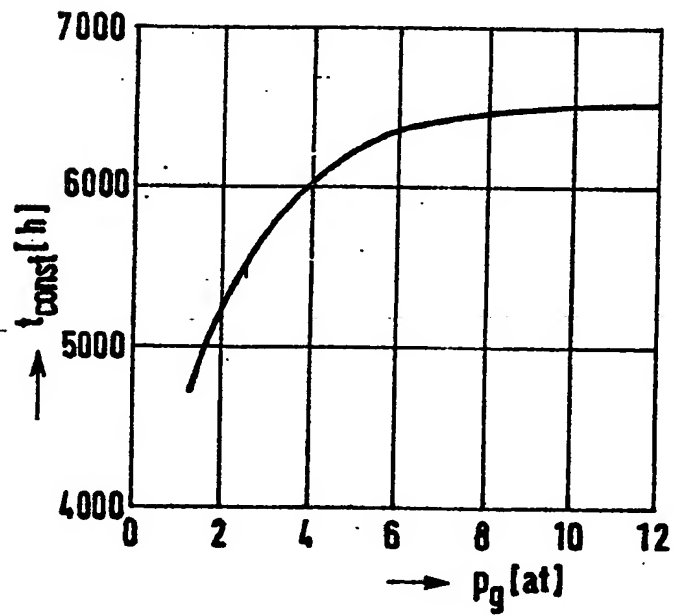


Fig.6



809817/0002

-16-

2624326

Fig.7

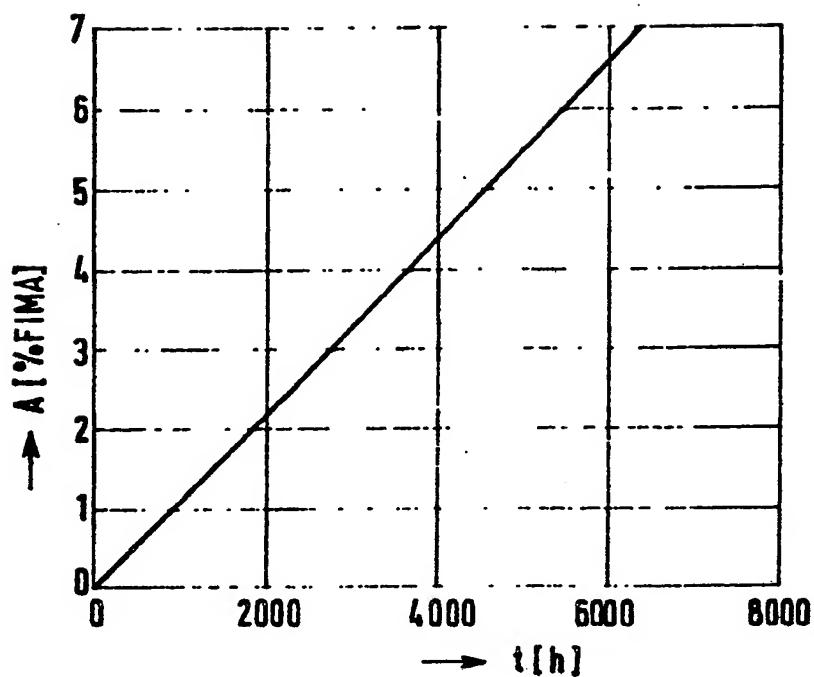
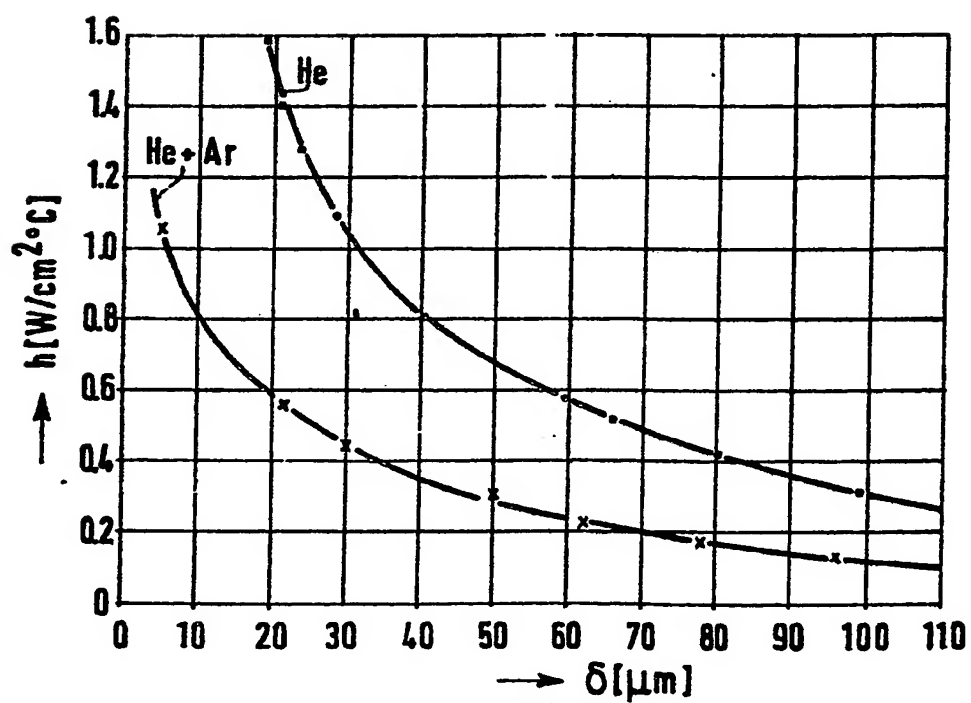


Fig.8



809817/0002

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**